



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## VLIV POVRCHOVÝCH NEROVNOSTÍ NA DALŠÍ VALIVÉ ELEMENTY LOŽISKA

INFLUENCE OF THE SURFACE ROUGHNESS FEATURES ON THE NEXT  
ROLLING BEARING ELEMENT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vladimír Saksa

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2017



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Vladimír Saksa**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. David Košťál, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Vliv povrchových nerovností na další valivé elementy ložiska

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednotlivé tvarové prvky povrchu valivých elementů, ať už umělé či reálné, ovlivňují rozložení tloušťky mazacího filmu. Tyto fluktuace mají význam zejména pro daný kontakt. Při sledu více valivých těles v jedné valivé dráze ovšem ovlivňují i další kontakty, jelikož jsou v podobě různorodého filmu neseny dále. I pro další valivé elementy tedy mohou představovat riziko z důvodu ovlivnění tloušťky mazacího filmu, přestože na dalších elementech již nemusí být žádné významné nerovnosti.

Typ práce: výzkumná

### Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je realizace experimentů s různě upravenými povrchy valivých elementů za účelem kvantifikace míry ovlivnění dalších kontaktů. Počítá se s využitím existující experimentální aparatury a měřicí metody v laboratořích ústavu konstruování.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- literární rešerše dané problematiky,
- příprava vzorků pro měření (mikrovrtisky, rýhy),
- realizace série experimentů,
- vyhodnocení dat z experimentů, tvorba průvodní zprávy.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

**Seznam literatury:**

LUGT, P. M. a G. E. MORALES-ESPEJEL. A Review of Elasto-Hydrodynamic Lubrication Theory. Tribology Transactions. 2011, 54(3), 470-496. DOI: 10.1080/10402004.2010.551804. ISSN 1040-2004. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402004.2010.551804>

VENNER, C. H., G. POPOVICI, P. M. LUGT a M. ORGANISCIK. Film Thickness Modulations in Starved Elastohydrodynamically Lubricated Contacts Induced by Time-Varying Lubricant Supply. Journal of Tribology. 2008, 130(4), 041501-. DOI: 10.1115/1.2958069. ISSN 07424787. Dostupné také z: <http://Tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1468105>

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. Fourth edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397776-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Táto bakalárska práca sa zaoberá skúmaním vplyvu povrchových nerovností na ďalšie valivé elementy ložísk. Skúma zmeny v profile filmu vstupujúceho do kontaktu. Práca popisuje taktiež elastohydrodynamický režim mazania, pri ktorom každé valivé ložisko pracuje, tak i rozdiel medzi plne zaplaveným a hladujúcim kontaktom valivého krúžku s valivým elementom ložiska. Súčasťou práce je experiment s použitím rôznych druhov mazív, z ktorého je viditeľné reálne ovplyvnenie týchto kontaktov. Tento experiment je realizovaný na simulátore kontaktu a hrúbka filmu je meraná pomocou metódy optickej interferometrie.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Ložisko, elastohydrodynamické (EHD) mazanie, hladovanie, kontakt, tvarová nerovnosť, optická interferometria, interferogram, hrúbka filmu

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with investigation of influence of the surface roughness features on the next rolling bearing elements. It researches changes in the film profile entering into the contact. This thesis describes also elastohydrodynamic lubrication regime by which each rolling bearing works as well as the difference between fully flooded and starvation contact of rolling ring with rolling bearing element. The part of the thesis is the experiment using different kinds of lubricants from which is visible really influence of these contacts. This experiment is realized on the contact simulator and the film thickness is measured using method of optical interferometry.

## **KEYWORDS**

Bearing, elastohydrodynamic (EHD) lubrication, starvation, contact, shape roughness feature, optical interferometry, interferogram, film thickness



**BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

SAKSA, V. *Vliv povrchových nerovností na další valivé elementy ložiska*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Košťál, Ph.D..





## **POĎAKOVANIE**

Chcel by som sa predovšetkým poďakovať vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Davidovi Košťálovi, Ph.D. za jeho čas, rady a zoznámenie s experimentálnymi zariadeniami počas celého priebehu vypracovania práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať taktiež svojej rodine, ktorá ma podporovala až do úspešného ukončenia štúdia.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že túto bakalársku prácu som vypracoval samostatne pod odborným vedením vedúceho práce Ing. Davida Košťála, Ph.D. a za použitia uvedenej literatúry.

V Brne dňa . . 2017

.....  
Vladimír Saksa



## OBSAH

<b>1 Úvod .....</b>	<b>12</b>
<b>2 Prehľad súčasného stavu poznania .....</b>	<b>13</b>
2.1 Tribológia .....	13
2.1.1 Opatrebenie .....	14
2.1.2 Mazanie .....	14
2.2 Elastohydrodynamické mazanie .....	14
2.2.1 História .....	14
2.2.2 Definícia EHL.....	15
2.3 Hladovanie.....	15
2.4 Chovanie nerovností v kontakte .....	17
<b>3 Analýza problému a cieľ práce .....</b>	<b>19</b>
<b>4 Materiál a metódy.....</b>	<b>20</b>
4.1 Príprava vzoriek.....	20
4.1.1 Leštenie vzoriek.....	20
4.1.2 Vytvorenie tvarových nerovností .....	20
4.2 Metóda merania .....	21
4.3 Meracie zariadenie.....	22
4.4 Postup merania .....	23
4.4.1 Príprava aparatury.....	23
4.4.2 Meranie.....	24
4.5 Použité mazivá.....	25
<b>5 Výsledky .....</b>	<b>26</b>
5.1 Povrchová nerovnosť .....	26
5.2 Výsledky experimentov .....	27
5.2.1 Meranie s použitím minerálneho oleja R834/80 .....	27
5.2.2 Meranie s použitím minerálneho oleja R560/88 .....	28
5.2.3 Meranie s použitím syntetického oleja SN650 .....	31
5.2.4 Meranie s použitím plastického maziva MOGUL LVT 2 EP .....	32
<b>6 Diskusia .....</b>	<b>35</b>
<b>7 Záver .....</b>	<b>36</b>
<b>8 Zoznam použitých zdrojov .....</b>	<b>37</b>
<b>9 Zoznam použitých skratiek, symbolov a veličín .....</b>	<b>39</b>
<b>10 Zoznam obrázkov a grafov .....</b>	<b>40</b>
<b>11 Zoznam tabuliek .....</b>	<b>42</b>

---

## 1 ÚVOD

Neoddeliteľnou súčasťou každého stroja sú ložiská. Sú to strojné súčiastky, ktoré zabezpečujú rotačný pohyb iných súčiastok stroja, predovšetkým hriadel'ov, a cez ktoré sa prenáša zaťaženie do rámu stroja. Preto tieto súčiastky musia byť vyrobené s určitými vlastnosťami ako dlhá životnosť, vysoká presnosť, nízke trenie a pod..

Aby ložisko malo spoľahlivý chod, musí byť dostatočne mazané. To znamená, že valivé elementy a krúžky valivých ložísk musí oddeľovať súvislá vrstva mazacieho filmu. Tá zabraňuje zadretiu ložiska odvádzaním tepla z kontaktu, zabránením vstupu nečistôt do kontaktu atď.. Hrúbka mazacieho filmu nesmie byť príliš hrubá, ani príliš tenká.

Ďalšou podmienkou pre bezproblémový chod ložiska je dokonalý povrch ako valivých krúžkov, tak i valivých elementov ložiska. Pri použití ložiska s poškodeným povrchom jedného z valivých elementov, nesená hrúbka mazacieho filmu z tohto kontaktu môže spôsobiť, že do ďalších kontaktov bude vchádzať rôznorodá hrúbka filmu. To môže mať za následok zlé mazanie kontaktov, čo vedie k hádzaniu, prehrievaniu až zadretiu ložiska.

## 2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

2

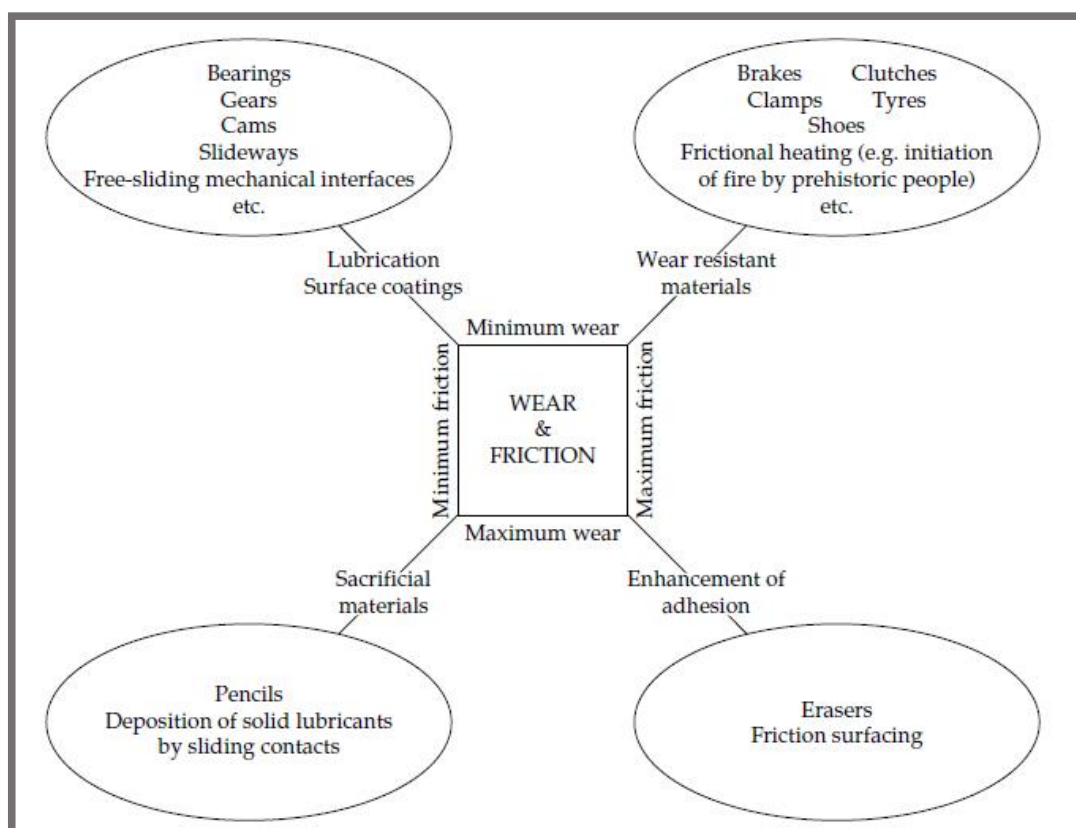
### 2.1 Tribológia

2.1

Tribológia je novou oblasťou vedy, definovanou v roku 1967 výborom Organization for Economic Cooperation and Development. Zameriava sa na trenie, opotrebenie a mazanie interagujúcich povrchov pri relatívnom pohybe. [1] Tribológia je odvodená z Gréckeho slova tribos, čo znamená trenie. [10]

Slovníky definujú tribológiu ako vedu a technológiu interagujúcich povrchov v relatívnom pohybe. [10] Analýza poškodených strojov ukazuje, že vo väčšine prípadov poruchy a výpadky sú spojené s interakciou pohyblivých častí, ako sú ozubené kolesá, ložiská, spojky, tesnenia, vačky, atď. [1] Interakcie povrchov v tribologickom rozhraní sú vysoko komplexné a ich porozumenie vyžaduje znalosť rôznych disciplín zahrňujúce fyziku, chémiu, aplikovanú matematiku, mechaniku, materiálové vedy a iné. [10]

Tribológia zahŕňa štúdium charakteristiky mazacích filmov medzi časťami telies a dôsledky zlyhania alebo neprítomnosti filmu, ktoré sa vždy prejavujú silným trením a opotrebením. Praktický cieľ tribológie je minimalizovanie dvoch hlavných nevýhod: trenia a opotrebenia, ale to nie je vždy možné. Minimalizovanie trenia a maximalizovanie opotrebenia alebo minimalizovanie opotrebenia a maximalizovanie trenia alebo maximalizovanie oboch, čiže trenia a opotrebenia, je žiadúce. Napríklad, zníženie opotrebenia, ale nie trenia je žiadané pri brzdách a mazacích spojkách. Zníženie trenia, ale nie opotrebenia je žiadúce v ceruzkách. Zvýšenie trenia aj opotrebenia je žiadúce v gumách (Obr.2.1). [1]



Obr. 2.1 Praktické ciele tribologie [1]

### 2.1.1 Opotrebenie

Opotrebenie môže byť definované ako progresívna strata látky vyplývajúca z mechanického pôsobenia medzi dvoma dotýkajúcimi sa povrchmi. Všeobecne tieto povrchy sú v relatívnom pohybe, buď posuvnom alebo valenom, a pod záťažou. [11] Takmer každá interakcia medzi pevnými časťami môže spôsobiť opotrebenie. Zlyhanie filmu zhoršuje relatívny pohyb medzi pevnými časťami a spôsobuje poškodenie styčných plôch. Výsledkom zlyhania filmu je silné opotrebenie. Takéto opotrebenie sa nazýva *adhézne opotrebenie*. K *abrazívnemu opotrebeniu* dochádza vždy, keď je objekt zaťažený časťami materiálu rovnakej alebo väčšej tvrdosti.

Ďalšie dve formy opotrebenia sú *erozívne opotrebenie*, ktoré vzniká v dôsledku dopadajúcich častíc, a *kavitačné opotrebenie* spôsobené rýchlosťou prúdu kvapalín. V niektorých prípadoch opotrebenie je spôsobené chemickým pôsobením v stykových plochách. Takáto forma opotrebenia je nazvaná ako *korozívne* alebo *oxidačné opotrebenie*. *Difúzne opotrebenie* sa vyskytuje na rozhraní vysokých teplôt. [1]

### 2.1.2 Mazanie

Úlohou mazania je znižovanie trenia, opotrebenia a zahrievania trecích povrchov nachádzajúcich sa v relatívnom pohybe. Povrchy valivých telies a obežné dráhy krúžkov valivých ložísk konajú relatívny pohyb. V kontaktnej oblasti dochádza nielen k valeniu, ale aj k preklzaniu, ktorej veľkosť je závislá od typu ložiska, jeho zaťaženia a režimu mazania. [9] Tenké vrstvy plynu, kvapaliny alebo tuhej látky sú vložené medzi dva povrchy za účelom zlepšenia plynulosti chodu a tiež, aby sa zabránilo poškodeniu. Tieto vrstvy materiálu oddeľujú kontaktujúce sa pevné časti a obvykle sú veľmi tenké a ťažko sa pozorujú. Všeobecne sa hrúbka týchto vrstiev pohybuje od 1 do 100  $\mu\text{m}$ , ale často sú i tenšie. [1]

Medzi hlavné úlohy maziva pri valivých ložiskách patrí vytváranie stáleho mazacieho filmu medzi trecími povrchmi, zaistenie odvodu tepla, ochrana povrchu ložiska proti korózii a zabránenie vnikaniu cudzích častíc (nečistôt) do ložiska. Existujú rôzne režimy mazania, kde medzi základné patrí medzné, hydrostatické, hydrodynamické a elastohydrodynamické mazanie. [9]

## 2.2 Elastohydrodynamické mazanie

### 2.2.1 História

História elastohydrodynamického mazania (EHL) siaha do roku 1886, kedy Reynolds publikoval jeho slávny článok, kde odvodil diferenciálne rovnice popisujúce rozloženie tlaku a únosnosť mazacích filmov pre ložiská [3]. V roku 1916 Martin [4] a Gümbel [5] aplikovali Reynoldsové rovnice na mazanie ozubených kolies a našli hrúbky mazacích filmov, ktoré boli ešte stále malé pre objasnenie mazania dokonalou vrstvou. V roku 1941 Meldahl [6] zahrnul elastické deformácie spôsobené tlakmi v kontakte, ale stále boli predpovede hrúbky filmov malé. V roku 1945 Ertel [7] zahrnul tlakovo-viskózný jav na hrúbku filmu a konečne mohla byť predpovedaná dokonalá vrstva. Odvtedy tento typ mazania je nazývaný ako *elasto hydrodynamické mazanie* (EHL). [2]

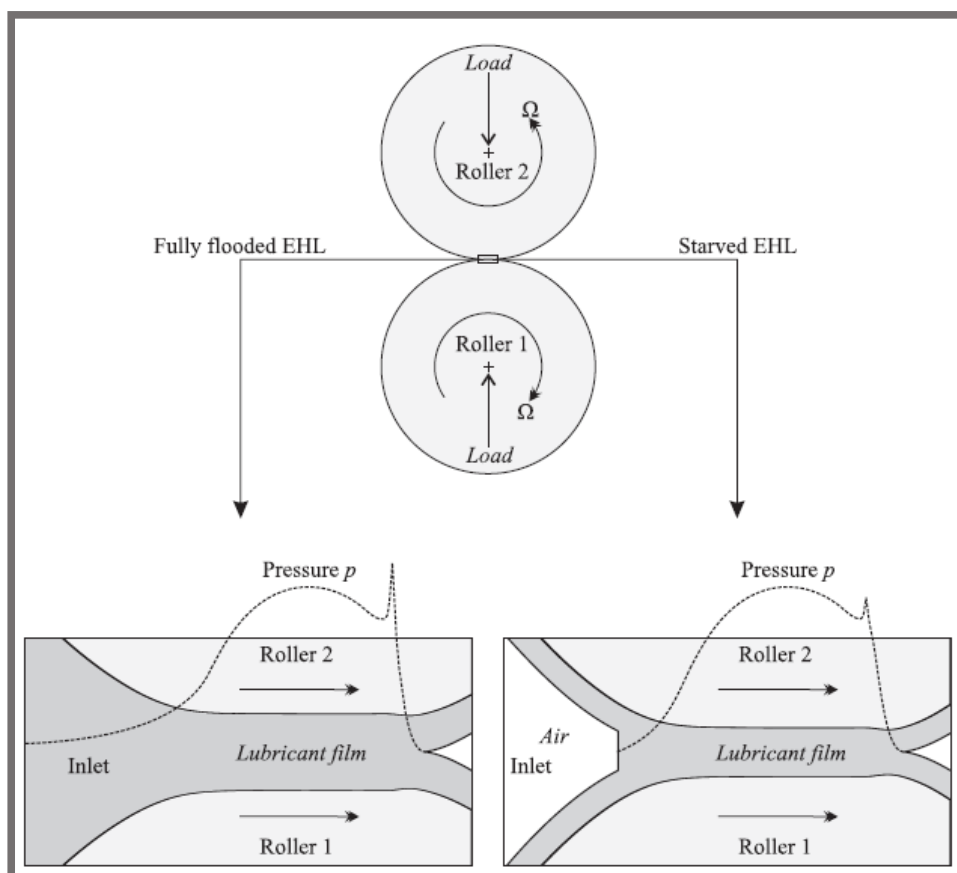
### 2.2.2 Definícia EHL

Elastohydrodynamické mazanie je typ mazania, ktorý nastáva pri kontaktoch, kde elastická deformácia mazaných povrchov má podstatný vplyv na hrúbku filmu. [2] Pre EHL je charakteristické výrazné navýšenie tlaku v mazacom filme vo vnútri kontaktnej oblasti. [9] Je to špeciálna forma hydrodynamického mazania zahrňujúca fyzikálnu interakciu medzi stykovými plochami a mazadlom. [1]

K takémuto režimu mazania dochádza v prípadoch, kedy mazivo je vťahované medzi trecie povrchy, ktoré sa po sebe navzájom odvalujú. [9] Takéto kontakty sa vyskytujú napr. vo valivých ložiskách, vačkových systémoch, ozubených kolesách, pružných tesneniach a ľudských kĺboch. Elastická deformácia je zapríčinená vysokými tlakmi v týchto kontaktoch, ktoré obyčajne spôsobujú podstatné navýšenie viskozity. Obe skutočnosti majú pozitívny vplyv na hrúbku mazacieho filmu. [2] Matematický popis vychádza z Hertzovej teórie styku elastických telies a Reynoldsovej teórie hydrodynamického mazania. [9]

### 2.3 Hladovenie

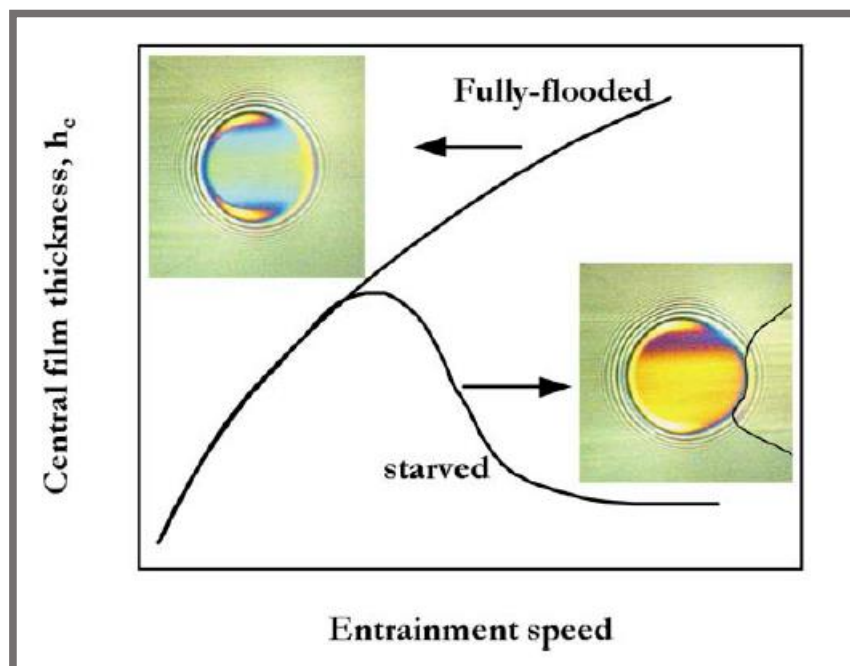
Hrúbka filmu v hladovennom elastohydrodynamicky mazanom kontakte nie je stanovená iba geometriou kontaktu, rýchlosťou a fyzikálnymi vlastnosťami mazadla, ale tiež zásobovaním kontaktu mazadlom. V prípade, že tento kontakt je plne zaplavený mazadlom, tlak sa začína hromadiť relatívne blízko vstupu (Obr.2.2 vľavo). Keď vstup nie je plne zaplnený mazadlom, kontaktujúce sa časti obsahujú dve vrstvy oleja, ktoré sa zlúčia pri vchode do kontaktu a tlak sa začne hromadiť iba v tomto bode (Obr.2.2 vpravo). Redukovanie v dodávaní mazadla bude znižovať



Obr. 2.2 Rozdiel medzi plne zaplaveným a hladujúcim kontaktom [8]

hrúbku mazacieho filmu a tvar charakteristického rozloženia tlaku v kontakte. V prípade silného hladovenia tvar tlaku v kontakte môže byť nahradená tvarom suchého kontaktu podľa Hertza. Hrúbka filmu bude rovná hrúbke vrstvy, ktorá plní kontakty stlačenej kontaktným tlakom. Tak hrúbka filmu bude 10-30% hrúbky vrstvy. [2]

Hladovenie nastane vždy, keď je k dispozícii len obmedzené množstvo maziva, ktoré môže vstupovať do kontaktu. V takomto prípade môže byť hrúbka vrstvy oveľa nižšia ako pre plne zaplavené podmienky. To je možné vidieť na Obr. 2.3, ktorý znázorňuje krivky závislosti hrúbky filmu na rýchlosti pre plne zaplavené a hladujúce podmienky. Na tomto obrázku sú vidieť tiež interferenčné obrazce urobené z EHL kontaktu. Na interferograme hladujúceho kontaktu (starved) je tiež vyznačený vstup maziva tzv. meniskus. Na interferograme plne zaplaveného kontaktu je možné pozorovať konštantnú hrúbku stredového filmu so zúžením po bokoch a zadnej časti kontaktu. Porovnaním kriviek je zrejmé, že pri plne zaplavenom režime mazania sa hrúbka filmu zvyšuje s rýchlosťou. V prípade hladujúcich podmienok sa hrúbka filmu takto správa len do určitej kritickej rýchlosti, kde následne začne so zvyšujúcou sa rýchlosťou klesať. Hrúbka filmu je v tomto režime často závislá na čase a jeho hodnota sa riadi mechanizmom zásobovania maziva a strát. Pokiaľ strata prevyšuje zásobovanie, vedie to k veľmi tenkej vrstve maziva, ktorá ďalej nemôže plniť svoju úlohu oddelenia stykových plôch, čo môže mať za následok zlyhanie komponentov. [19]



Obr. 2.3 Typická EHL hrúbka filmu v závislosti na rýchlosti pre plne zaplavené a hladujúce podmienky. Interferogramy hladujúceho a plne zaplaveného kontaktu. [19]



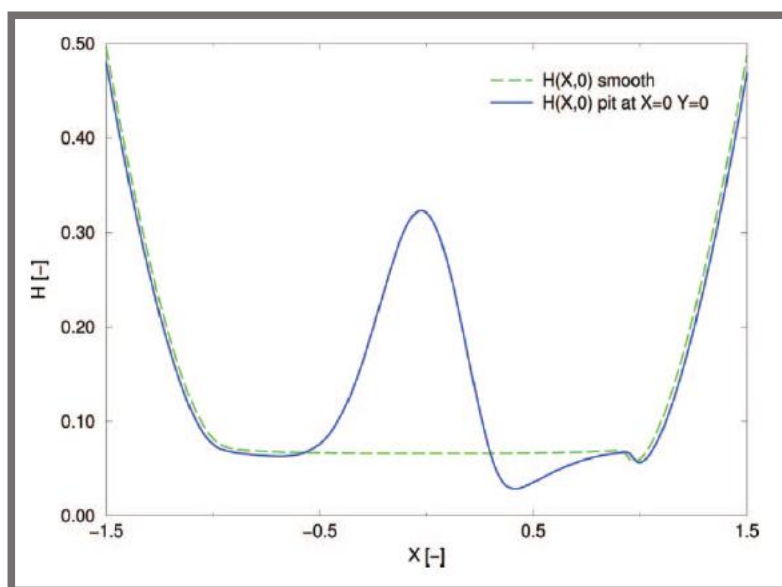
## 2.4 Chovanie nerovností v kontakte

Jedná sa o povrchy obsahujúce nerovnosti ako napríklad jamky tzv. denty.

Akamatsu a kol. [12], [13] boli prví, ktorí zverejnili článok popisujúci vzorky s jamkovým povrchom, ktoré zlepšujú životnosť a stupeň kovového kontaktu pri chabých mazacích podmienkach. Táto práca bola vyvrátená Zhaiom a kol. [14], ktorí bližšie skúmali tieto povrchy a pomocou výpočtov ukázali, že jamkové povrchy nemôžu zlepšiť nahromadenie filmu pri čistom valení. Hrúbka filmu by sa vlastne nepriaznivo znížila a tieto povrchy by viedli k tlakom vytvárajúce koncentrované pnutie v okolí dentov. [2]

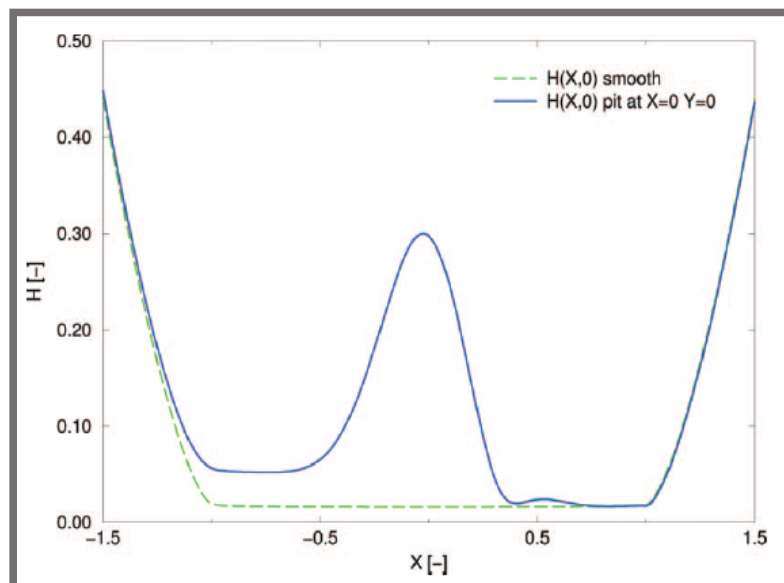
V roku 2000, Dumont a kol. [15] ukázali, že pozitívny efekt jamkových povrchov vnikne v prípade hladových mazacích podmienok. Obr. 2.4 a Obr. 2.5 zobrazuje profil dentu pozdĺž osy  $x$  tak, že dent je umiestnený v strede kontaktu. Porovnaním týchto profilov možno vidieť, že redukcia amplitúdy dentu je podobná pre oba prípady. Naopak rozdiel sa objavuje v profile filmu za dentom.

Pre plne zaplavené podmienky (Obr. 2.4) platí, že profil filmu v okolí dentu je podobný hladkému profilu filmu. [2]



Obr. 2.4 Hrúbka filmu plne zaplaveného kontaktu [2]

Pre hladujúce podmienky, zmeny v profile filmu sú viditeľné za dentom (Obr. 2.5). Porovnaním týchto dvoch obrázkov môžeme vidieť, že hrúbka filmu za dentom pri hladujúcich podmienkach je skoro trikrát väčšia ako pred ním, ktorá sa veľmi nelíši od hladko hladujúcej hrúbky filmu. Pri plne zaplavenom prípade vidíme, že film za dentom je dosť zmenený v porovnaní s hladkou plne zaplavenou hrúbkou filmu. [2]



Obr. 2.5 Hrúbka filmu hladujúceho kontaktu [2]

### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

---

**3**

V súčasnej dobe sa kladú veľké nároky na bezproblémový chod či už technických alebo iných zariadení a strojov. Jeden z problémov je uloženie všetkých pohyblivých častí strojov, ktoré sú často uložené vo valivých ložiskách. Každé valivé ložisko pritom pracuje pri elastohydrodynamickom režime mazania.

Jednotlivé tvarové nerovnosti na povrchu valivých elementov ovplyvňujú rozloženie hrúbky mazacieho filmu v kontakte valivého elementu a krúžku. Pri chode týchto elementov za sebou, kde jeden z nich by obsahoval nejakú povrchovú nerovnosť, budú ovplyvňované nasledujúce valivé elementy ložiska. Hrúbka filmu a jeho rozloženie v týchto kontaktoch bude ovplyvňovaná práve tvarom a hrúbkou filmu, ktorý bude vchádzať do kontaktu.

Cieľom tejto bakalárskej práce je skúmať a zistiť, ako bude ovplyvňovaný nasledujúci kontakt hladkého valivého elementu s krúžkom, filmom neseným z predchádzajúceho kontaktu. Práca sa zaoberá meraním hrúbky filmu a jeho rozloženia, ktoré budú daný kontakt ovplyvňovať. Použitá je ocelová guľička, na ktorej povrchu sa vyskytujú rôzne tvarové nerovnosti. Tieto experimenty budú vykonané ako pre plne zaplavené podmienky, tak i pre hladujúce podmienky, čím bude zistená miera hladovenia kontaktu. Dôležité je skúmať oba kontakty pri rovnakých mazacích podmienkach.

## 4 MATERIÁL A METÓDY

### 4.1 Príprava vzoriek

Pri experimente použijeme ako vzorky valivé elementy guľôčkového valivého ložiska, teda oceľové guľičky o priemeru 1", pretože u elementov ako sú valčeky by sme nevyvinuli dostatočné zaťaženie daného valivého elementu, keďže sa valčekové ložiská používajú pre oveľa väčšie zaťaženia ako guľôčkové ložiská.

#### 4.1.1 Leštenie vzoriek

Každá z valivých elementov sa musí dôkladne očistiť, pretože i tá najmenšia nečistota na povrchu môže ovplyvniť alebo znemožniť meranie či kalibráciu. Preto sa v prvom kroku musia tieto elementy vyleštiť. To sa robí pomocou troch špeciálnych leštiacich pást, z ktorých každá obsahuje brúsne častice iných veľkostí a tvrdostí. Tieto pasty sú označené číslom a používajú sa v určitom poradí. Leštenie dokončujeme použitím leštiacej pasty označenej číslom 1. Pasty sa v tomto poradí po jednom nanášajú na špeciálny nástroj, ktorý môžeme upnúť napr. do vŕtačky. Leštený element usadený v prípravku môžeme upnúť do sústruhu alebo do druhej vŕtačky. Konkrétne leštenie sa prevádza pritláčaním nástroja s pastou na element a vzájomnými pohybmi zapríčiníme „chaosový“ pohyb brúsnych častíc, ktorý nám leští daný povrch. Bližším popisom leštenia povrchov sa zaoberá práca: [17].

V druhom kroku leštený povrch dokončíme rozpúšťadlom, ako je napr. isopropylalkohol alebo acetón, naneseným na čistú vreckovku, s ktorou utrieme element a tým sa zbavíme ostatných nečistôt. Rozdiel medzi vylešteným a nevylešteným povrchom znázorňuje Obr. 4.1.

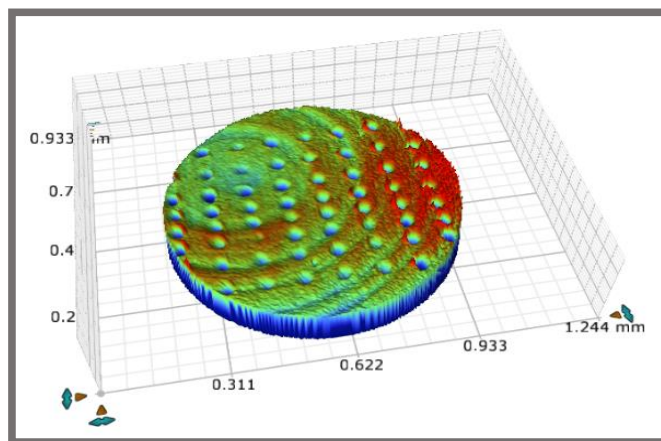


Obr. 4.1 Porovnanie vylešteného (vľavo) a nevylešteného (vpravo) povrchu [17]

#### 4.1.2 Vytvorenie tvarových nerovností

Tvarové nerovnosti môžeme urobiť až po leštení, pretože leštením povrchov na ktorých sa dané nerovnosti už vyskytujú, by sme mohli zahľadiť hrany, čo je pre experiment nežiadúce.

Na tvorbu mikronerovností použijeme dentátor. Jedná sa o zariadenie, ktoré je založené na princípe merania tvrdosti materiálu, teda vnikaním indentoru do telesa. Indentor, diamantový kužeľ, je vtlačovaný určitou silou do guľičky a tým dôjde k plastickej deformácii a vytvoreniu jamky. Rôzne iné druhy vytvárania mikronerovností sú podrobne rozpísané v práci: [18].



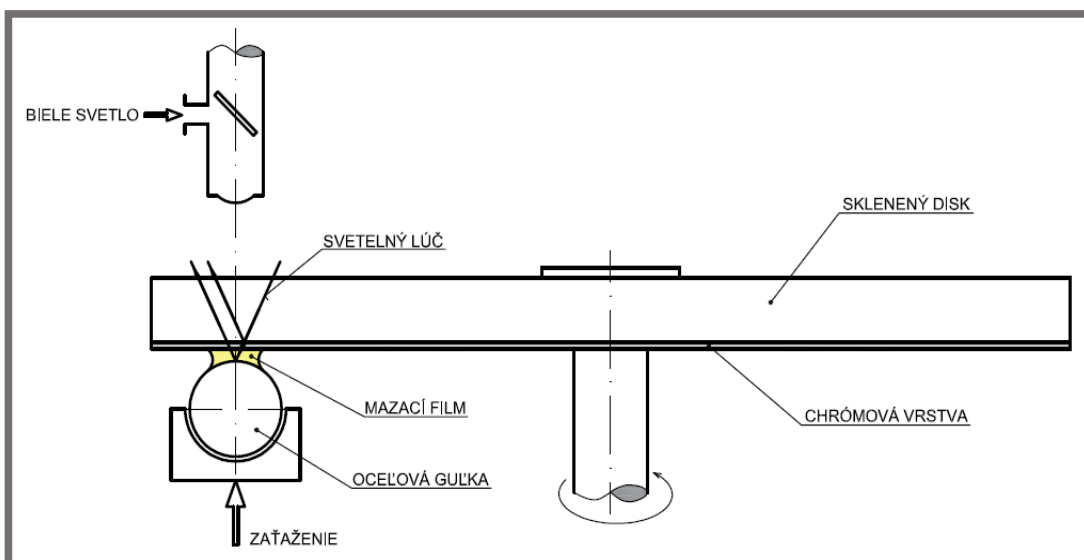
Obr. 4.2 Pole dentov

Na Obr. 4.2 je znázornené pole dentov vytvorené na povrchu guľičky práve týmto spôsobom v laboratóriu ústavu konštruovania.

## 4.2 Metóda merania

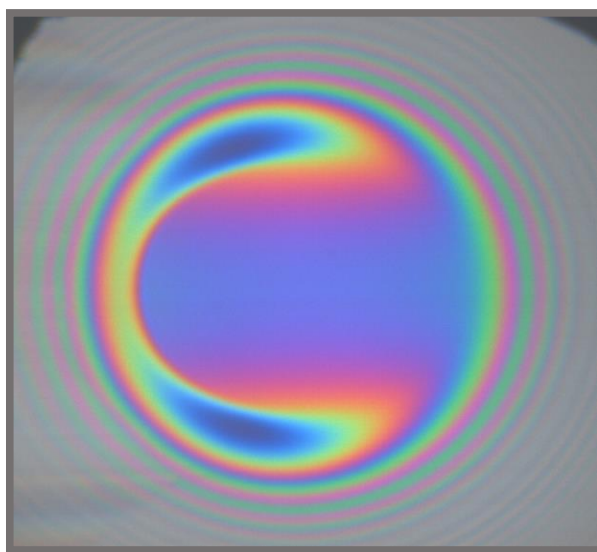
4.2

Existujú rôzne metódy merania hrúbky filmu, z ktorých použijeme metódu **optickej interferometrie** (Obr. 4.3). Táto metóda využíva oceľovú guľôčku, ktorá je poháňaná skleneným diskom, kde v kontakte sa nachádza čisté valenie. Disk je pokrytý na jednej strane tenkou chrómovou vrstvou.



Obr. 4.3 Princíp optickej interferometrie

Pri svietení bieleho svetla do kontaktu, ktorého zdrojom je halogénová žiarovka, časť tohto svetla sa odráža od chrómovej vrstvy aplikovanej na sklenenom disku a smeruje do objektívu. Druhá časť svetla prechádza cez túto chrómovú vrstvu, ďalej cez mazadlo a odrazí sa až pri dopade na povrch oceleovej guľôčky, kde následne smeruje tiež do objektívu. Intenzita týchto dvoch odrazených lúčov je podobná a tie budú interferovať, buď konštruktívne alebo deštruktívne, za vzniku interferenčného obrazca. To vedie k odstupňovaniu farieb v závislosti od hrúbky filmu v kontakte. Pretože hrúbka filmu je rovnakého rádu ako vlnová dĺžka viditeľného svetla, toto svetlo môže byť použité na meranie hrúbky filmu. Odpovedajúca optická hrúbka filmu je určená pomocou farieb z obrazca získaného optickou interferometriou tzv. interferogramu (Obr. 4.4). Skutočná hrúbka filmu je získaná po rozdelení optickej hrúbky filmu indexom lomu kvapaliny. [1]



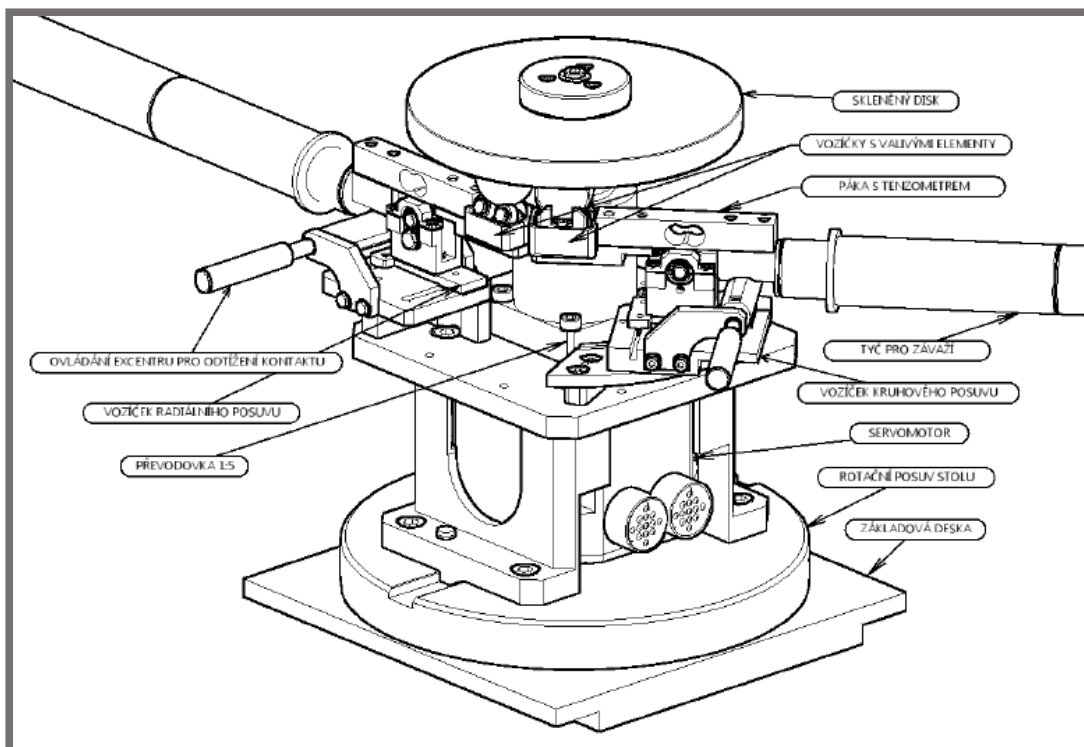
Obr. 4.4 Interferogram

---

### 4.3 Meracie zariadenie

Na meranie sa použije zariadenie (Obr. 4.5), ktoré je schopné simulovať dva kontakty. Tie sa nachádzajú v jednej valivej dráhe, ako je to v prípade valivých ložísk.

Hlavnými časťami tohto zariadenia je sklenený disk, jeho pohon a dve páky, na ktorých sú uložené valivé elementy ložiska. Servomotor poháňa iba sklenený disk, na ktorý zo spodnej strany tlačia valivé elementy ložiska. Prítlačná sila je vyvinutá ramenami tyč, na ktoré sa dajú uložiť závažia. Keďže tyče sú uložené v rotačných väzbách, tieto závažia vytvárajú momenty síl, ktoré sa na druhej strane tyče prejavia prítlačnou silou valivých elementov na sklenený disk. Tieto sily sú merané pomocou snímačov síl umiestnených na každom z pák. Rotačný pohyb skleneného disku uvádza do pohybu valivé elementy. V týchto kontaktoch sa nachádza valenie s nízkym preklzom.



Obr. 4.5 Náčrt meracieho zariadenia [16]

## 4.4 Postup merania

Postup merania sa skladá z dvoch častí, ktoré sú detailnejšie popísané v nasledujúcich podkapitolách.

4.4

### 4.4.1 Príprava aparatury

Ako aj valivé elementy, tak i meracie zariadenie musí byť pripravené. Jednou z najdôležitejších častí aparatury, ako bolo spomenuté v kapitole 4.3, je sklenený disk. Tento disk musí byť tiež očistený od otlakov, prachu a iných nečistôt. Ako vychádza z optickej interferometrie, presnosť merania závisí od vlastností svetla prechádzajúceho cez disk, ktoré v prítomnosti nečistôt by sa mohli líšiť, ba dokonca znemožniť meranie. Keďže pri meraní svetlo prechádza cez celý disk, musia byť očistené obe strany disku. Čistenie sa prevádza tak, že obe povrchy disku sa očistia obrúskom navlhčeným v rozpúšťadle. Na očistené povrchy následne nie je vhodné siahať.

4.4.1

Ďalej nasleduje zostavenie aparatury. K zariadeniu sa pripojí digitálna kamera Phantom, ktorá sníma kontakt cez objektív mikroskopu. Následne sa valivé elementy uložia do vozíčkov podľa Obr. 4.5. V týchto vozíčkoch sú umiestnené malé valivé ložiská, na ktoré valivé elementy dosedajú tak, že sa môžu voľne otáčať. Nakoniec uložíme sklenený disk na hnací hriadeľ servomotora a zaistíme maticou. Jedná sa o tretí spoj medzi hriadeľom servomotora, maticou a diskom. Tento spoj je dosiahnutý dotiahnutím troch skrutiek matice. Otočením mikroskopu tak, aby sa objektív nachádzal nad snímaným kontaktom, je aparatura pripravená na meranie.

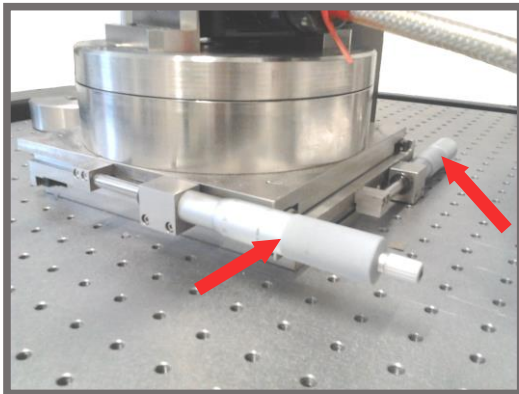


#### 4.4.2 Meranie

Kontakt je snímaný digitálnou vysokorýchlostnou kamerou Phantom, ktorej vizuálny obraz je vidieť v softvéri dodávanej k tejto kamere. V tomto softvéri je možné nastaviť požadované rozlíšenie snímaného obrazu ako aj počet snímok za sekundu pri nahrávaní videa.

Predtým, ako začneme hľadať vizuálny obraz kontaktu, je potrebné daný kontakt zaťažiť. Zaťaženie a odťaženie kontaktu je docielene ovládaním excentru umiestneného na oboch pákach.

Ovládanie stolu, na ktorom je simulátor kontaktu umiestnený, sa robí pomocou dvoch mikrometrov (Obr. 4.6). Tie simulátor posúvajú dvoma na seba kolmými smermi. Snímanie druhého kontaktu sa dosiahne otočením stolu a doladením mikrometrami a kolieskom mikroskopu. Keď sa kontakt nachádza pod objektívom, je potrebné ho zaostriť pomocou kolieska na boku stojana mikroskopu (Obr. 4.7), čím mikroskop približujeme alebo oddľujeme od disku.



Obr. 4.6 Posuv stolu



Obr. 4.7 Koliesko mikroskopu

Otáčky servomotora sa nastavujú pomocou meniča frekvencie, ktorý dané otáčky udržiava s odchýlkou  $\pm 1$  ot/min. Nastavením otáčok a zapnutím servomotora sa začne sklenený disk otáčať, kde sa pomocou trakčnej sily dajú do pohybu aj valivé elementy uložené vo vozíčkoch.

Pridávanie maziva do kontaktu je možné manuálne pomocou injekčnej striekačky alebo dávkovača maziva podľa toho, koľko maziva chceme do kontaktu

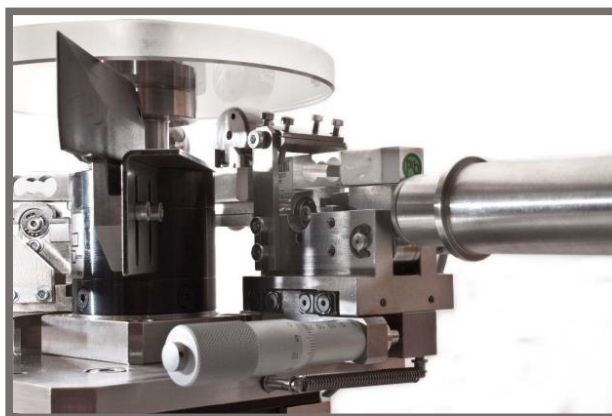


Obr. 4.8 Stierač maziva [21]



pridať. Ďalšia regulácia maziva privádzaná do kontaktu je možná pomocou stierača maziva (Obr. 4.8), ktorý je umiestnený pod diskom a pomocou pružiny je k nemu pritláčaný. Prebytočné mazivo je stierané a následne steká do nádoby umiestnenej pod ním.

Väčšie zaťaženie oboch kontaktov je dosiahnuté pomocou uloženia závaží na tyče k tomu určené. Pri otáčaní disku začne prvý kontakt zanechávať stopu. Do tejto stopy je potrebné dostať i druhý kontakt, aby bolo viditeľné, aké zmeny v profile filmu po sebe zanecháva prvý kontakt. Dosiahne sa to otáčaním mikrometru, umiestneného na boku druhej páky (Obr. 4.9), ktorý nám kontakt posúva v radiálnom smere vzhľadom k osi rotácie disku.



Obr. 4.9 Radiálny posuv páky [21]

Konkrétne meranie sa robí zachytávaním snímok kontaktu, či už prvého alebo druhého, a následným vyhodnotením týchto snímok v programe Achilles.

#### 4.5 Použité mazivá

4.5

Pre experiment boli vybrané rôzne typy mazív minerálne, syntetické i plastické. Vďaka rozličným vlastnostiam použitých mazív, ktoré sú uvedené v Tab. 4.1, sa dajú ďalej očakávať rozličné výsledky. Použité mazivá boli vybrané hlavne podľa ich dynamickej viskozity, ktorá ovplyvňuje rýchlosť vtekania daného maziva naspäť do kontaktu.

Tab. 4.1 Vlastnosti použitých mazív

Mazivo	Typ maziva	Index lomu [-]	Dynamická viskozita pri 22 °C [Pa·s]
R834/80	Minerálny olej	1,498	0,200
R560/88	Minerálny olej	1,496	1,400
SN650	Syntetický olej	1,488	0,450
MOGUL LVT 2 EP	Plastické (minerálny olej + Li mýdlo)	1,493	0,415

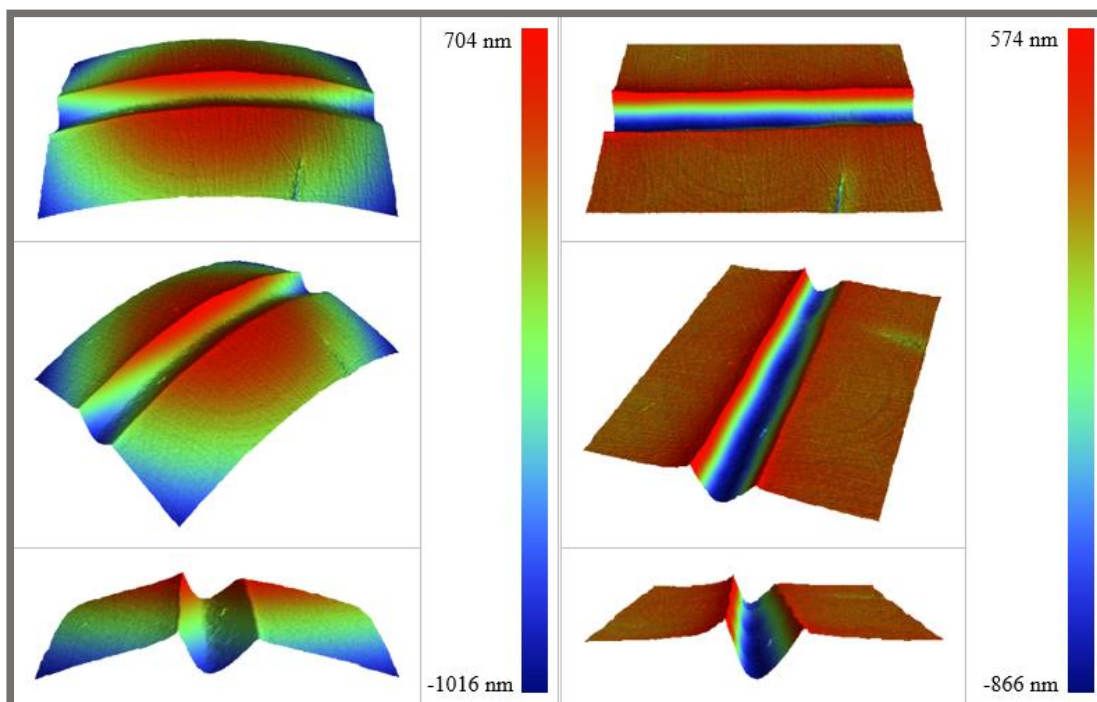
## 5 VÝSLEDKY

Táto kapitola je rozdelená do dvoch hlavných častí. Prvá opisuje nerovnosť, ktorá bola urobená na valivom elemente, vrátane jej hlavných rozmerov. Druhá časť zobrazuje výsledky nameraných hodnôt, vynesené do grafov, s konkrétnymi interferogramami. Jednotlivé krivky v grafoch sú zarovnané na nulovú hodnotu, čiže z osy y sa nedá odčítavať skutočná hodnota, ale znázorňujú skutočný profil filmov poprípade nerovnosti.

### 5.1 Povrchová nerovnosť

Jedná sa o ryhu, ktorá bola urobená na povrchu guľičky. Je umiestnená tak, že pri rotácii prechádza miestom styku guľičky s diskom, čiže pozorovaného kontaktu. Je orientovaná rovnobežne s osou rotácie guľičky.

Jej skutočný profil bol získaný zmapovaním povrchu guľičky pomocou profilometru od firmy BRUCKER a následným vyhodnotením v programe Vision64. Jednotlivé snímky sú zobrazené na Obr. 5.1. Ľavý stĺpec zobrazuje skutočný profil povrchu guľičky, kým v pravom stĺpci je povrch guľičky rozvinutý do roviny.



Obr. 5.1 Profil povrchu guľičky

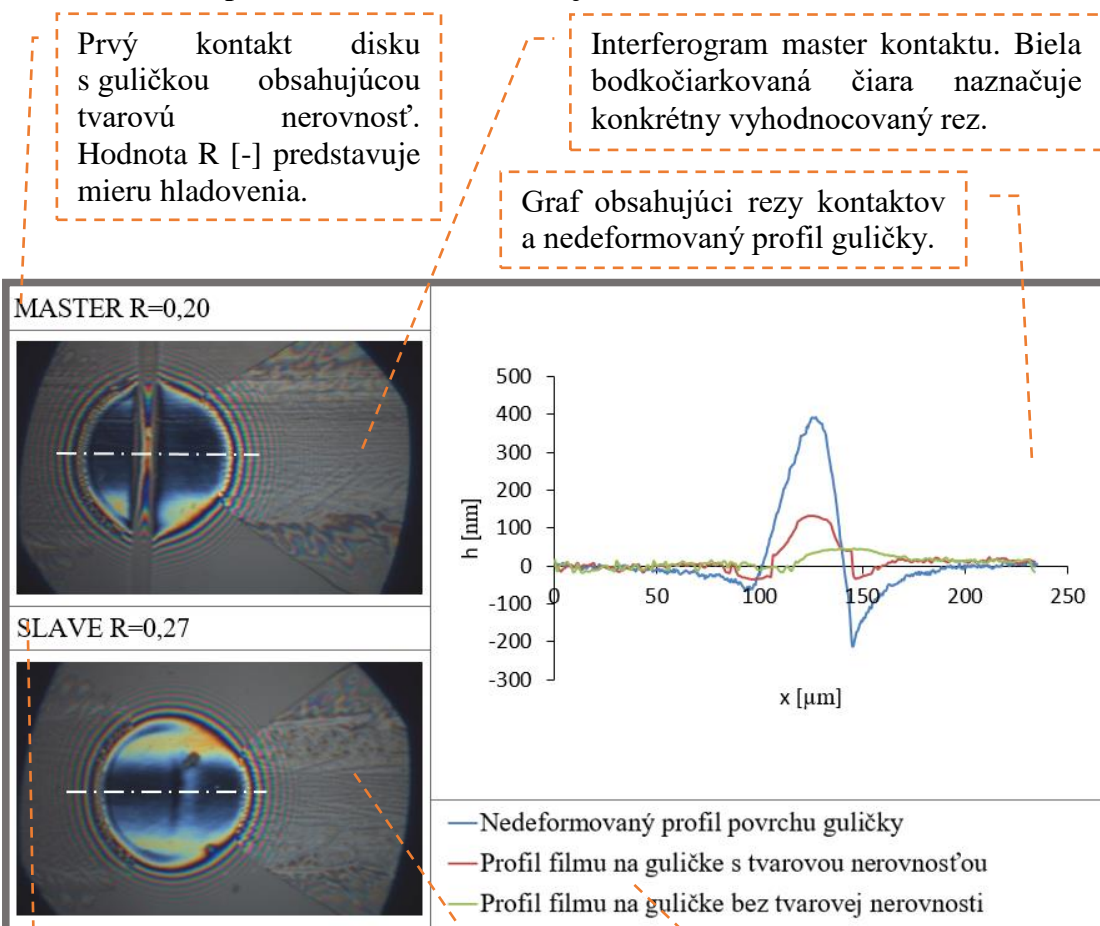
Tiež je viditeľné, ako sa zdeformovali okraje tejto ryhy. Priradením okoliu ryhy nulovú hodnotu, na jednej strane je materiál vytlačený do výšky 178,8 nm, na druhej strane iba do výšky 38,3 nm. Hĺbka dosahuje -410,5 nm vzhľadom k nulovej hodnote. Šírka tejto drážky je 57,7 nm meranej v rovine nulovej hodnoty.

Uvedené hodnoty sú vzaté z jedného rezu, preto sa tieto hodnoty s pozíciou rezu trochu líšia. Veľkosť záberu snímanej plochy je 0,235 mm × 0,314 mm.

## 5.2 Výsledky experimentov

Všetky merania sa realizovali pri rovnakej rýchlosti valenia 0,31 m/s pri použití prevodovky s prevodovým číslom 5. Táto hodnota bola vypočítaná z polomeru valenia, otáčok motoru a prevodového čísla použitej prevodovky. Teplota okolia počas všetkých experimentov dosahovala hodnoty 19,7 °C s odchýlkou  $\pm 1$  °C.

### 5.2.1 Meranie s použitím minerálneho oleja R834/80



Obr. 5.2 Vyhodnotenie 1

Druhý kontakt disku s guličkou neobsahujúcou tvarovú nerovnosť. Hodnota R [-] predstavuje mieru hladovania tohto kontaktu.

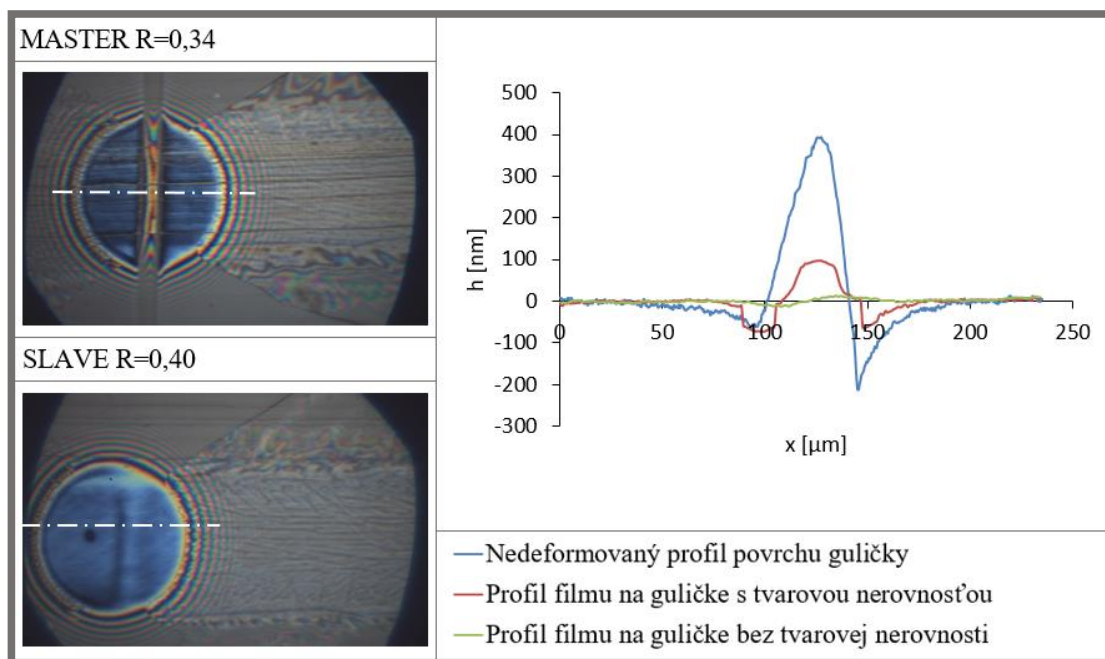
Interferogram slave kontaktu. Biela bodkočiarkovaná čiara naznačuje konkrétny vyhodnocovaný rez.

Pri tejto miere hladovania (Obr. 5.2) hrúbka filmu v prvom kontakte v strede tvarovej nerovnosti dosahuje maximálnu hodnotu 181,3 nm. Ďalej je možné si povšimnúť, že mazivo pri daných podmienkach nevypĺňa úplne danú tvarovú nerovnosť tak, aby bola zrovnaná na hodnotu v okolí danej nerovnosti, ktorá sa pohybuje okolo 51,3 nm. Tvar filmu sa po stranách ryhy znižuje a smerom do stredu nerovnosti začína hrúbka filmu rapídne stúpať až k maximálnej hodnote.

Stopa v profile filmu v druhom kontakte, ktorú po sebe zanechal prvý kontakt, je viditeľná. Hrúbka filmu v okolí tejto stopy je okolo 66 nm. Z tejto

hodnoty sa hrúbka filmu začína dosť prudko zvyšovať, až dosiahne maximálnej hodnoty, a to 108 nm. Ďalej táto maximálna hodnota prechádza mierne zase na hodnotu hrúbky filmu v okolí stopy. Taktiež je viditeľné, že nárast hrúbky filmu pred stopou je strmější ako za ňou.

Z grafu vyplýva, že pri týchto mazacích podmienkach, nárast hrúbky filmu v strede ryhy v prvom kontakte navýšil hrúbku filmu v druhom kontakte o približne 42 nm vzhľadom k hrúbke filmu v okolí stopy.



Obr. 5.3 Vyhodnotenie 2

Pri lepších mazacích podmienkach (Obr. 5.3), teda väčšou hodnotou  $R$ , je možné vidieť, že druhý kontakt bol ovplyvnený trochu iným spôsobom ako v prvom prípade. Hrúbka filmu v prvom kontakte má podobný tvar ako v prvom prípade, ale maximálna hodnota hrúbky filmu vystupuje až na 180,4 nm. Stopa v druhom kontakte začína miernym vydutím na minimálnu hodnotu 88 nm a následným nárastom hrúbky filmu až k maximálnej hodnote 114,5 nm. Táto hodnota začína ďalej klesať až na hodnotu v okolí stopy, ktorá dosahuje okolo 99,1 nm.

Porovnaním týchto dvoch kriviek je možné povedať, že nárast hrúbky filmu v strede tvarovej nerovnosti v prvom kontakte spôsobil mierny pokles o 11,1 nm a následné malé navýšenie hrúbky filmu o 15,4 nm v druhom kontakte vzhľadom k hrúbke filmu v okolí stopy.

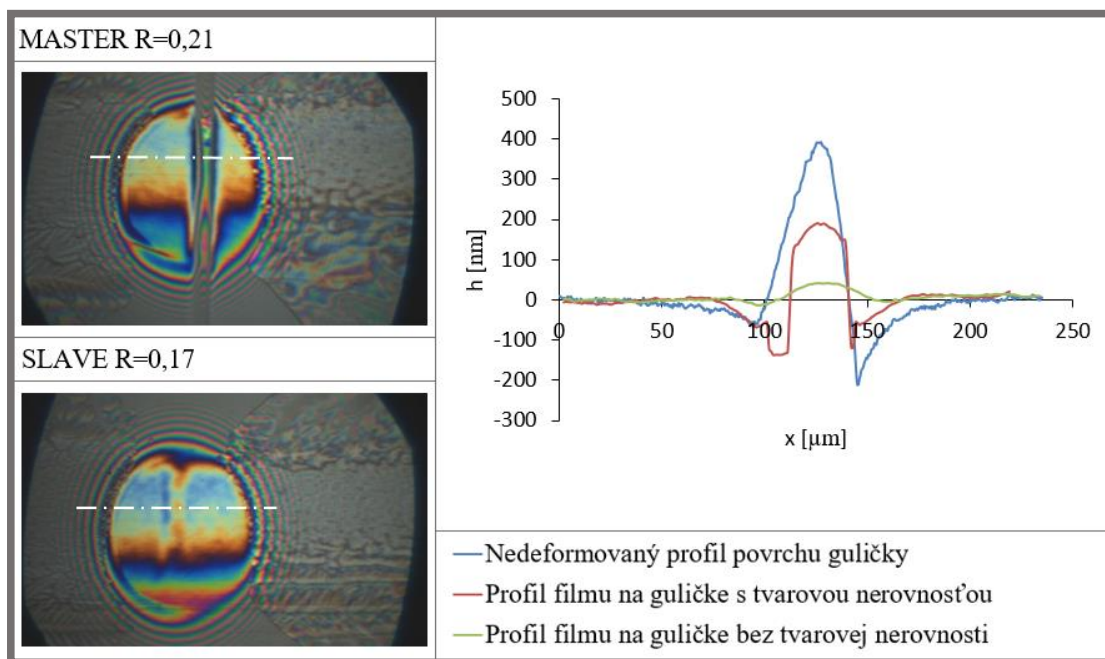
### 5.2.2 Meranie s použitím minerálneho oleja R560/88

V tomto meraní bol použitý minerálny olej s vyššou dynamickou viskozitou.

Pri prvých podmienkach (Obr. 5.4) je možné pozorovať omnoho väčší nárast hrúbky filmu v prvom kontakte v strede tvarovej nerovnosti ako v minulom prípade. Táto hodnota hrúbky filmu dosahuje až 327,9 nm. Hrúbka filmu po stranách ryhy sa prejavuje veľkým poklesom. V okolí ryhy sa hrúbka filmu pohybuje v priemere na hodnote 137,2 nm.

V druhom kontakte je viditeľné ovplyvnenie v profile filmu, ktoré po sebe zanecháva prvý kontakt. Prejavuje sa poklesom v hrúbke filmu po stranách tejto stopy, kde minimálna hodnota dosahuje 106,9 nm. Tiež je vidieť, že väčší pokles je pred stopou ako za ňou. Smerom k stredu tejto stopy sa hrúbka filmu mierne zvyšuje až na maximálnu hodnotu 162,2 nm. V okolí je hrúbka filmu 119,2 nm.

Z uvedeného grafu vyplýva, že nárast hrúbky filmu v prvom kontakte značne ovplyvňuje nárast hrúbky filmu i v druhom kontakte s miernym poklesom po stranách ryhy.

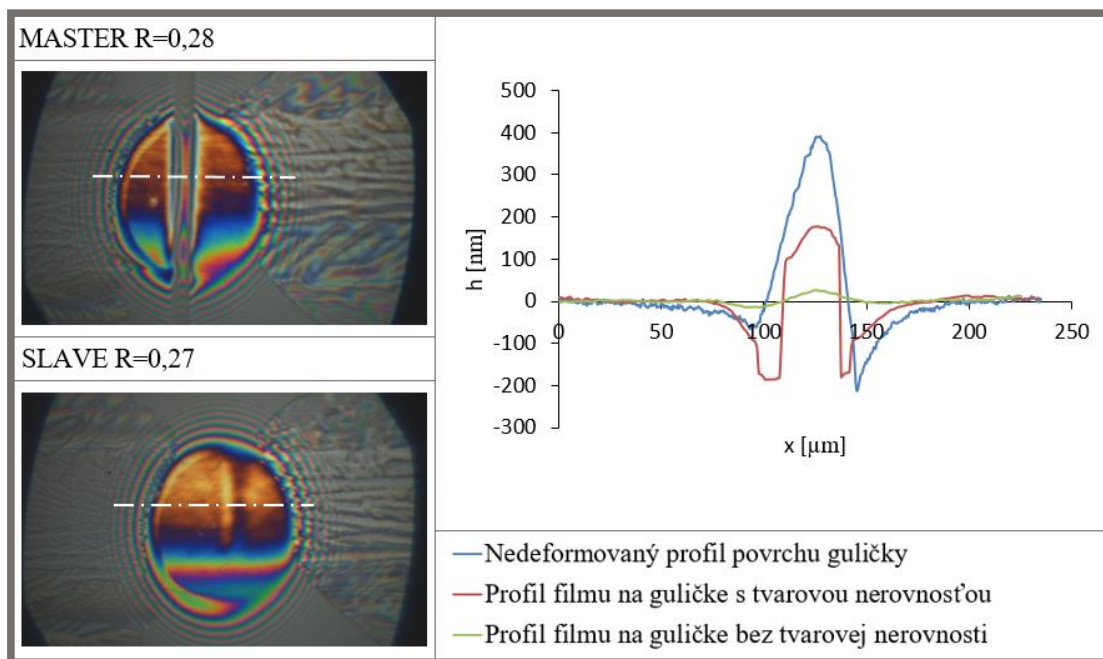


Obr. 5.4 Vyhodnotenie 3

Na Obr. 5.5 je znázornené vyhodnotenie pri lepších mazacích podmienkach. Hrúbka filmu v strede prvého kontaktu dosahuje maximálnej hodnoty 366,2 nm a smerom od stredu prudko klesá. V okolí tejto ryhy sa hrúbka filmu pohybuje okolo hodnoty 187,2 nm. Maximum z prvého kontaktu sa prejavuje v profile filmu v druhom kontakte tak, že hrúbka filmu vzrastie z hodnoty 181,5 nm nachádzajúcej sa v okolí stopy, na hodnotu 220,1 nm. V tomto prípade je ovplyvnenie menšie ako v predchádzajúcom prípade.

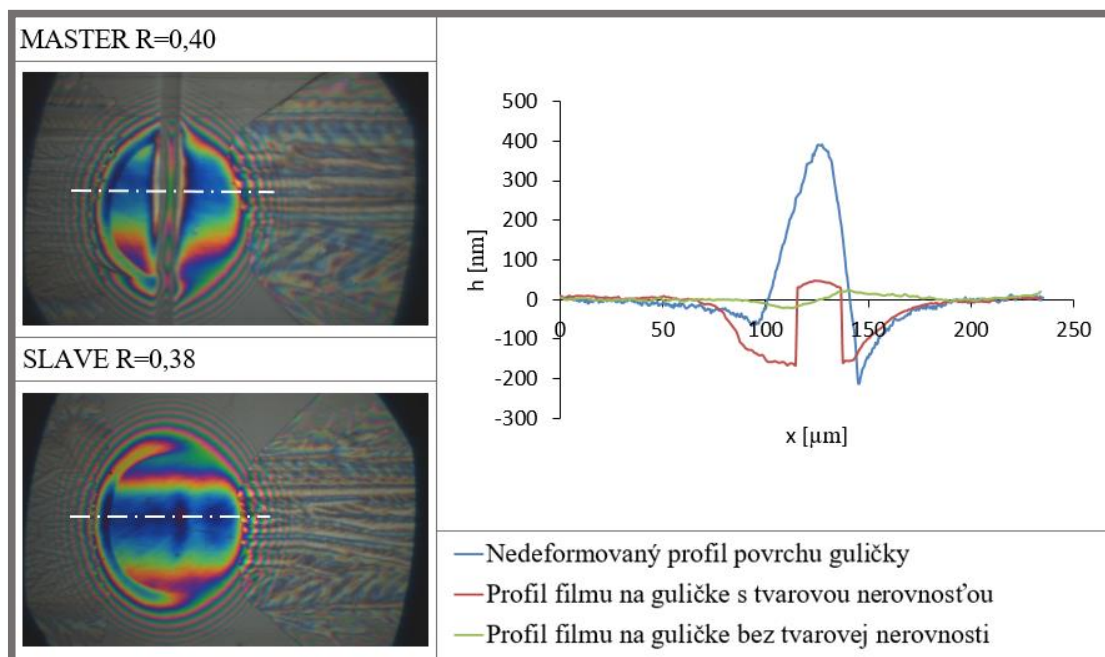
Keďže profil filmu na guličke s tvarovou nerovnosťou, zobrazený na Obr. 5.5, bol skladaný z viacerých dát, skok pri náhlom vzraste hrúbky filmu nemusí odpovedať skutočnosti.





Obr. 5.5 Vyhodnotenie 4

Pri týchto mazacích podmienkach (Obr. 5.6) je možné vidieť, že druhý kontakt bol ovplyvnený najmenej. Maximálna hrúbka filmu uprostred ryhy má hodnotu 310,7 nm. Po stranách ryhy je možné vidieť výrazné zmenšenie v hrúbke filmu s následným navýšením na zmienenú maximálnu hodnotu. Ako bolo spomenuté v predchádzajúcom prípade, náhly nárast v hrúbke filmu nemusí odpovedať skutočnosti z dôvodu skladania jednotlivých hrúbok filmu. V okolí tejto ryhy sa hrúbka filmu pohybuje v priemere na hodnote 263,8 nm.



Obr. 5.6 Vyhodnotenie 5

Stopa v profile filmu v druhom kontakte, ktorú po sebe zanechal prvý kontakt vyzerá nasledujúco. Hrúbka filmu sa z hodnoty 247,6 nm nachádzajúcej sa v okolí stopy začína jemne prepadať až k minimálnej hodnote hrúbky filmu 227 nm. Následne sa začne zase zvyšovať až dosiahne najväčšiu hodnotu, a to 271,1 nm. Potom z tejto hodnoty mierne klesá na hodnotu hrúbky filmu v okolí ryhy.

Porovnaním týchto dvoch kontaktov je zrejmé, že nárast hrúbky filmu v prvom kontakte ovplyvnil hrúbku filmu v druhom kontakte poklesom hrúbky filmu o 20,6 nm a následným vzrastom o 23,5 nm vzhľadom k hrúbke filmu nachádzajúcej sa v okolí stopy.

### 5.2.3 Meranie s použitím syntetického oleja SN650

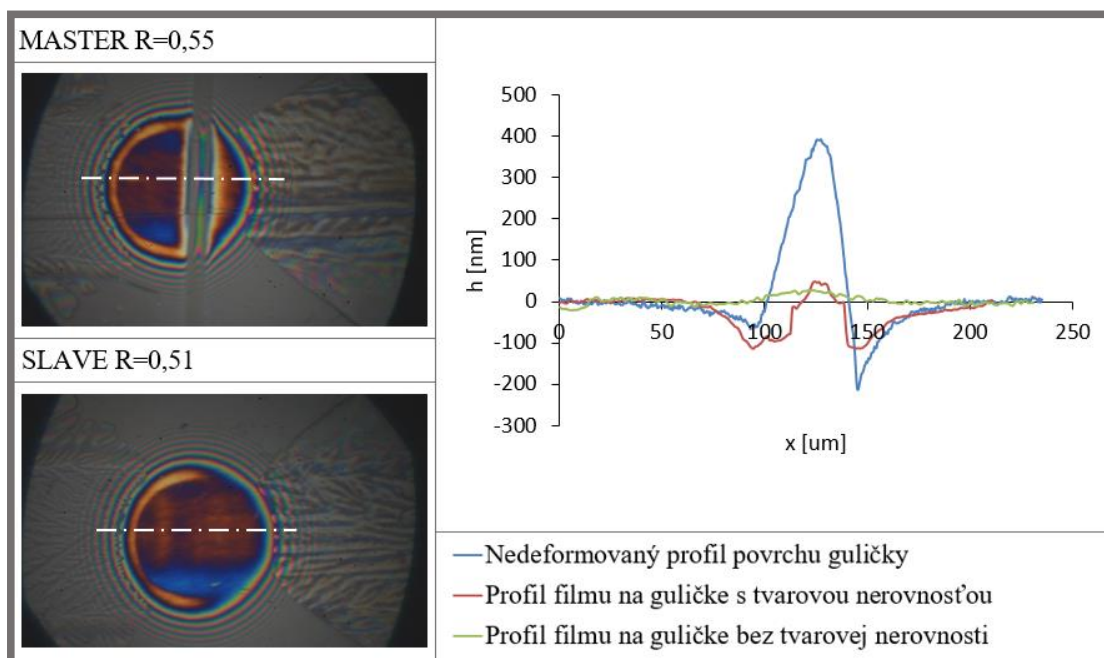
Použitím tohto oleja sa podarilo namerať hodnoty iba pri jediných mazacích podmienkach. Pri iných podmienkach, v druhom kontakte buď neboli vidieť žiadne stopy ovplyvnenia hrúbky filmu alebo sa miera hladovenia menila tak rýchlo, že sa nepodarilo zachytiť dva interferogramy pri rovnakých podmienkach mazania.

Z Obr. 5.7 je možné vidieť, že maximálna hrúbka filmu v strede prvého kontaktu sa veľmi nelíši od hrúbky filmu v okolí tvarovej nerovnosti. Hrúbka filmu v strede dosahuje maxima na hodnote 254,7 nm a v okolí ryhy sa nachádza film o hrúbke v priemere 207,7 nm.

Stopa v profile filmu v druhom kontakte, ktorú po sebe zanechal prvý kontakt, je ale viditeľná. Je možné vidieť mierny nárast hrúbky maziva z priemernej hodnoty 205,2 nm, nachádzajúcej sa v okolí stopy, na maximálnu hodnotu hrúbky filmu 231,6 nm tejto stopy.

Je viditeľné, že navýšenie hrúbky filmu v strede prvého kontaktu mierne navýšilo i hrúbku filmu v druhom kontakte.

5.2.3

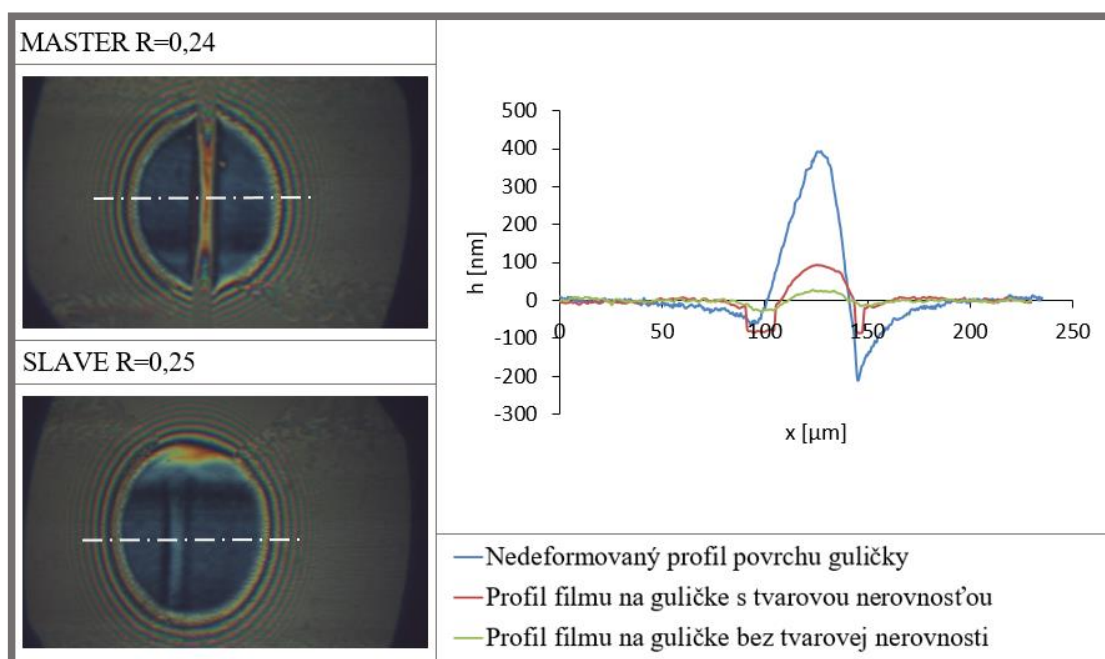


Obr. 5.7 Vyhodnotenie 6

#### 5.2.4 Meranie s použitím plastického maziva MOGUL LVT 2 EP

Na Obr. 5.8 sú znázornené výsledky merania pri prvých mazacích podmienkach. Hrúbka filmu v strede ryhy dosahuje hodnoty hrúbky filmu 244,9 nm. Po stranách tohto nahromadenia filmu je možné vidieť pokles hrúbky filmu. V okolí danej nerovnosti sa nachádza film o priemernej hrúbke 131,9 nm.

Stopa v druhom kontakte, ktorú po sebe zanechal prvý kontakt, je tvarovaná nasledovne. Z priemernej hrúbky filmu v okolí stopy s hodnotou 123,9 nm sa hrúbka filmu začína znižovať a vytvárať priehlbinu o maximálnej hĺbke 103,1 nm. Následne sa začína hrúbka filmu zvyšovať až nad úroveň priemernej hrúbky filmu v okolí a dosahuje maximálnej hodnoty 149,5 nm. Ďalej táto hrúbka filmu klesá a vytvára ďalšiu priehlbinu, ale o trochu menšej hĺbke. Nakoniec sa táto hrúbka filmu zvyšuje až do dosiahnutia hrúbky filmu v okolí ryhy.



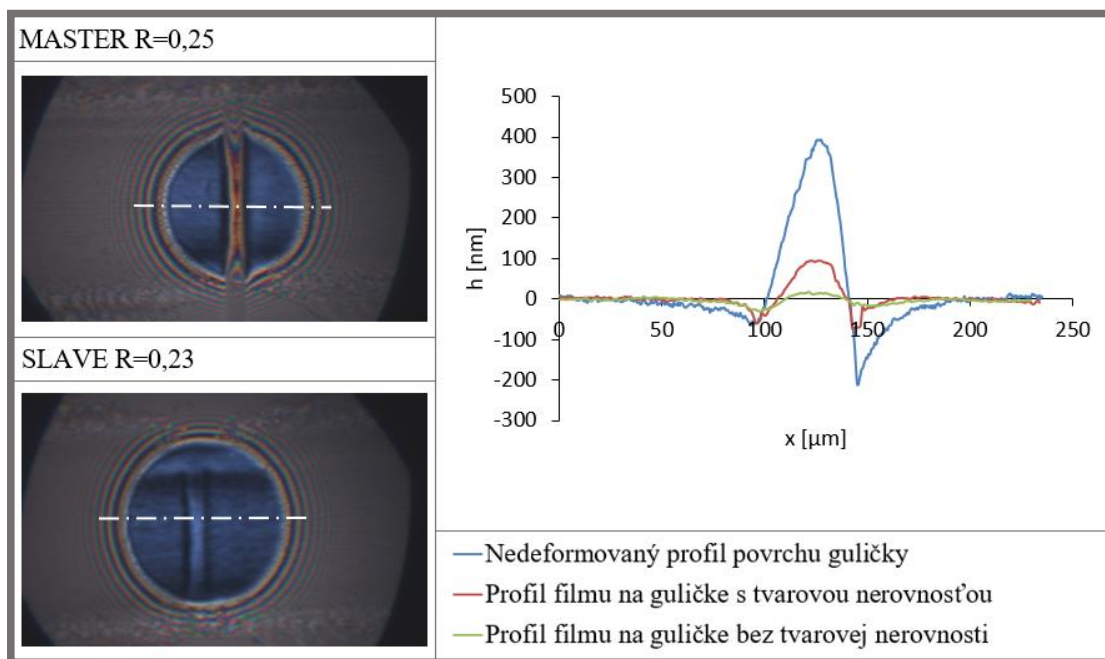
Obr. 5.8 Vyhodnotenie 7

Obr. 5.9 znázorňuje meranie pri zvýšenej miere hladovania z  $R = 0,24$  na  $R = 0,25$ . Výsledky z tohto merania sú veľmi podobné ako v predchádzajúcom prípade.

Hrúbka filmu v strede prvého kontaktu dosahuje maximálnej hodnoty 199,7 nm. Zníženie hrúbky filmu po bokoch tvarovej nerovnosti je podobné ako v minulom prípade. V okolí nerovnosti je hrúbka filmu v priemere 105,3 nm.

Stopa v druhom kontakte prechádza z priemernej hrúbky filmu o hodnote 103,8 nm do menšej hrúbky filmu o maximálnej hĺbke 74,3 nm. Následne sa zvyšuje po hodnotu 121,6 nm. Ďalej začne opäť klesať a vytvára menšiu priehlbinu, ktorá je následne zrovnaná do hrúbky filmu v okolí tejto stopy.

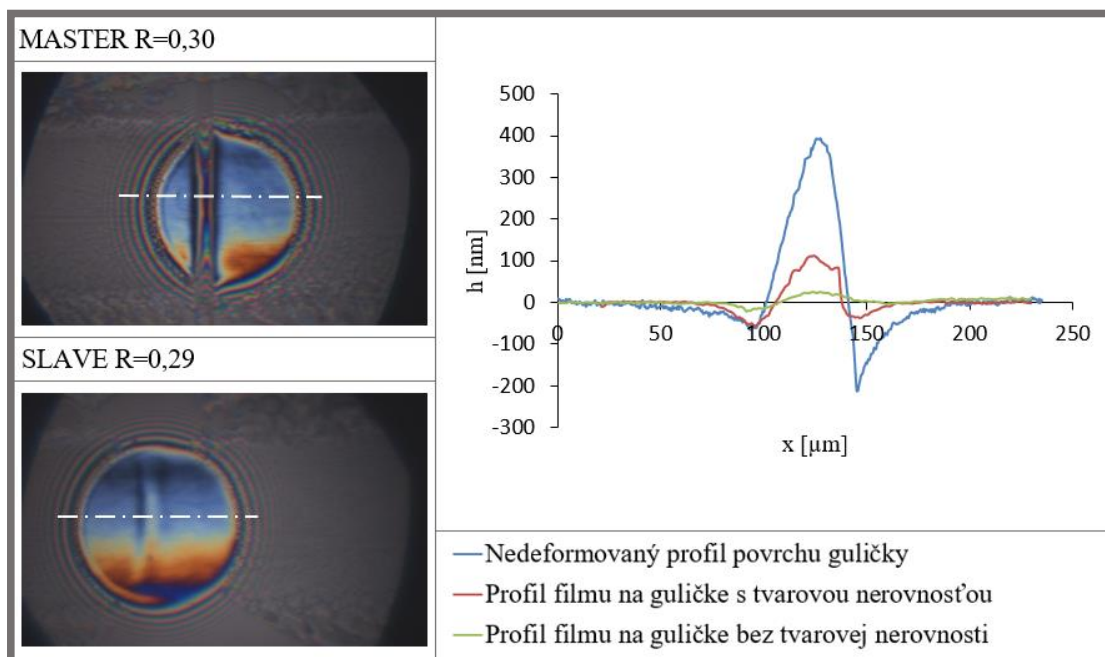




Obr. 5.9 Vyhodnotenie 8

Na Obr. 5.10 je výsledok merania s o čosi väčšou mierou hladovania. Hrúbka filmu v strede prvého kontaktu dosahuje maximálnu hodnotu 244,9 nm. Po stranách tohto navýšenia sa opäť hrúbka filmu znižuje a v okolí ryhy dosahuje priemernej hodnoty 131,9 nm.

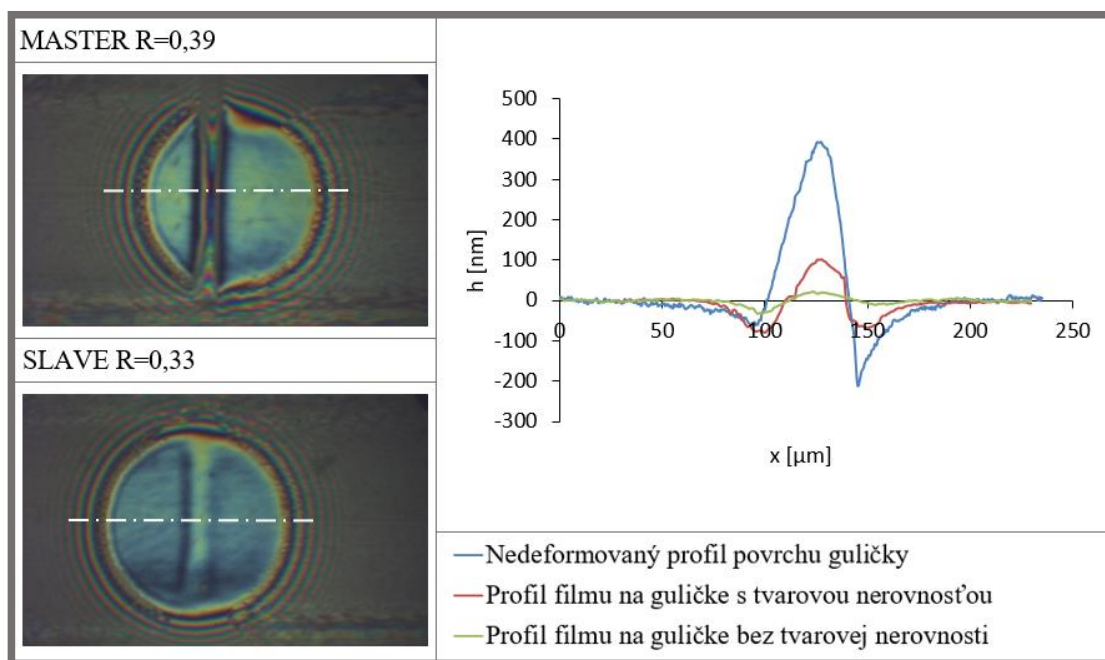
Hrúbka filmu v druhom kontakte v okolí stopy dosahuje priemernú hodnotu 123,9 nm a z tejto hodnoty začína klesať a vytvárať preliačinu o maximálnej hĺbke 103,1 nm. Následne sa zvyšuje až nadobudne vyššiu úroveň ako okolie stopy a dosiahne maximálnu hodnotu 149,5 nm. V tomto prípade už následne klesá len na úroveň hrúbky filmu v okolí stopy a nevytvára žiadnu ďalšiu zmenu v profile filmu.



Obr. 5.10 Vyhodnotenie 9

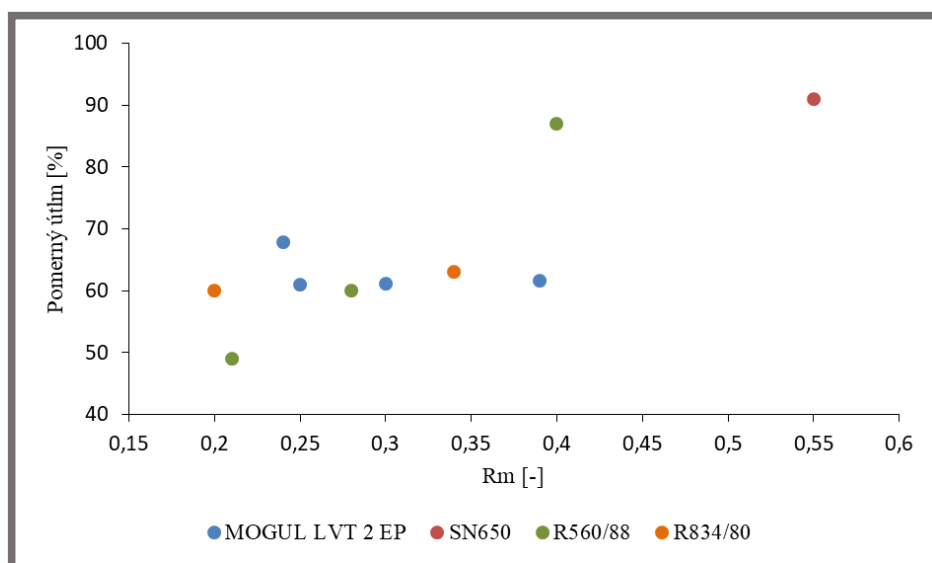
Pri ďalších podmienkach mazania (Obr. 5.11) dosiahla hrúbka maziva v strede tvarovej nerovnosti prvého kontaktu hodnotu 261,4 nm. Po stranách tento nerovnosti sa hrúbka filmu znižuje ako tomu bolo i v predchádzajúcich prípadoch. Okolie ryhy má film o hrúbke v priemernej hodnote 159,7 nm.

V druhom kontakte toto navýšenie filmu zanechalo viditeľnú stopu. Vytvorilo navýšenie filmu na hodnotu 161,2 nm. V okolí tejto stopy sa nachádza vrstva maziva o hodnote 139,4 nm. Navýšenie vzniklo teda o 21,8 nm. Pred touto stopou je viditeľný pokles hrúbky filmu na hodnotu 106,2 nm.



Obr. 5.11 Vyhodnotenie 10

Nasledujúci graf zobrazuje závislosť pomerného útlmu na miere hladovenia jednotlivých použitých mazív.



Graf. 5.12 Závislosť pomerného útlmu na miere hladovenia ( $R_m$ ) kontaktu

## 6 DISKUSIA

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo zistiť, aký vplyv majú povrchové nerovnosti na nasledujúce valivé elementy ložiska. Tento vplyv bol zistený vykonaním experimentu s použitím rôznych druhov mazív s rozličnými vlastnosťami. U všetkých meraniach boli zistené zmeny v profile filmu ako nahromadenie alebo zmenšenie hrúbky filmu na určitých miestach v dôsledku povrchovej nerovnosti.

Nasledujúca Tab. 6.1 zobrazuje percentuálne hodnoty nárastu a poklesu hrúbky filmu v kritických miestach kontaktu vzhľadom k hrúbke filmu nachádzajúcej sa v okolí tvarovej nerovnosti.

Tab. 6.1 Prehľad nárastu a poklesu filmu

Číslo vyhodnotenia	Mazivo	Nárast [%]	Pokles [%]
1	R834/80	63,6	-
2	R834/80	15,7	11,2
3	R560/88	36,1	10,3
4	R560/88	21,3	7,9
5	R560/88	9,5	8,3
6	SN650	12,9	-
7	MOGUL LVT 2 EP	20,7	16,8
8	MOGUL LVT 2 EP	17,1	28,4
9	MOGUL LVT 2 EP	20,7	16,8
10	MOGUL LVT 2 EP	15,7	23,8

Jedným z problémov bola zložitosť vyhodnotenia niektorých hrúbok filmu. Jedná sa o grafy na Obr. 5.4, 5.5 a 5.6, kde hrúbka filmu smerom k stredu tvarovej nerovnosti vzrástla skokom. Tento skok sa objavuje z dôvodu skladania jednotlivých hrúbok filmu, pretože zvolená metóda hrúbku filmu ako celok vyhodnocovala nesprávne. Z tohto dôvodu tieto zmeny v hrúbke filmu nemusia odpovedať skutočnosti.

Ďalším problémom a nedostatkom tejto práce je skutočnosť, že vyhodnotená nerovnosť ako aj jej vplyv na ďalší valivý element, bola len jedna ryha. I keď boli vykonané na guľičke ryhy a denty rozličných geometrií, povrchové nerovnosti väčších rozmerov sa obtiažne vyhodnocovali. Naopak malé denty a ryhy zanechávali príliš malú, v niektorých prípadoch žiadnu, zmenu či ovplyvnenie hrúbky filmu v nasledujúcom kontakte. Z týchto dôvodov bola za najvyhovujúcejšiu tvarovú nerovnosť vybraná k vyhodnocovaniu jej vplyvu na ďalší valivý element práve táto ryha. Taktiež by bolo vhodné urobiť viacero meraní v prípade jednotlivých použitých mazív, z ktorých by bolo možné získať viacero výsledkov.

---

## 7 ZÁVER

Je zrejmé, že tvarové nerovnosti na povrchu valivých elementov ovplyvňujú nasledujúce valivé elementy, ktoré už túto vadu nemusia mať. U takýchto nedokonalostí povrchu valivých elementov môžu nastať prípady ako nedostatočné mazanie stykových plôch, hádzanie, zahrievanie až zadretie ložiska.

Výsledkom tejto bakalárskej práce bolo zistiť mieru ovplyvnenia nasledujúceho kontaktu pri použití guľičky s tvarovou nerovnosťou. Z počiatku sa práca popisuje elastohydrodynamický režim mazania, pri ktorom súčiasťky ako sú valivé ložiská, pracujú. Taktiež popisuje, aké dva prípady môžu pri mazaní ložísk nastať, a síce plne zaplavené alebo hladujúce podmienky. Následne je uvedené chovanie sa povrchových nerovností v kontakte.

Nasledujúca kapitola najprv popisuje prípravu použitých vzoriek, od leštenia až po vytváranie povrchových nerovností. Následne je popísaná metóda a princíp merania optickou interferometriou. Jedným z hlavných bodov je tiež popis použitej meracej aparatury a taktiež druhy použitých mazív.

Ďalej sa práca zameriava na geometrické rozmery vytvorenej tvarovej nerovnosti a merania s výsledkami z experimentov. Sú tu zobrazené grafy s konkrétnymi interferogramami, z ktorých je viditeľné ovplyvnenie daného kontaktu. Z rôznych druhov mazív najväčšie ovplyvnenie bolo zistené pri použití minerálneho oleja R834/80, kedy v nasledujúcom kontakte sa ovplyvnenie prejavilo nárastom hrúbky filmu vzhľadom k okolitej hrúbke o 63,6 %, čo predstavuje navýšenie o 42 nm.

S pomerne veľkým ovplyvnením bol i kontakt pri použití minerálneho oleja R560/88, kedy sa ovplyvnenie prejavilo nárastom so súčasným poklesom v hrúbke filmu na určitých miestach. Nárast hrúbky filmu bol o 36,1 %, čo predstavuje 43 nm. Pokles bol o 10,3 %, čo predstavuje 12,3 nm. Tento minerálny olej dosiahol i najmenšie ovplyvnenie, ale pri inej miere hladovenia kontaktu. Nárast hrúbky filmu bol len o 9,5 %, čo predstavuje 23,5 nm. Pokles bol o 8,3 %, čo predstavuje 20,6 nm.

Výsledky boli závislé na miere hladovenia kontaktu. Obecnne platilo, čím bola miera hladovenia menšia (vyššie číslo R), bolo i ovplyvnenie hrúbky filmu menšie. Taktiež sa dali predpokladať rôzne výsledky vplyvom viskozity jednotlivých mazív, podľa ktorej boli mazivá vybrané. V tomto prípade by malo platiť, čím má mazivo väčšiu viskozitu, tým by malo byť ovplyvnenie a teda i nárast filmu väčšie. Ukázalo sa to v prípade maziva s najväčšou viskozitou R560/88. Celkovo sa to ale nepotvrdilo, pretože mazivo s najmenšou viskozitou R834/80 patrí podľa meraní k najviac ovplyvňujúcim. To ale môže byť spôsobené už spomenutou mierou hladovenia kontaktu.

Keďže táto práca skúma ovplyvnenie len jednej tvarovej nerovnosti, jednej ryhy, bolo by vhodné vytvoriť viacero rozličných tvarových nerovností, z ktorých by sa dali získať viaceré dáta. K navýšeniu počtu dát by sa merania mohli taktiež realizovať i pri rôznych otáčkach.

## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

8

- [1] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. Fourth edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397776-2.
- [2] LUGT, P. M. a G. E. MORALES-ESPEJEL. *A Review of Elasto-Hydrodynamic Lubrication Theory*. Tribology Transactions. 2011, 54(3), 470-496. DOI: 10.1080/10402004.2010.551804. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402004.2010.551804>
- [3] REYNOLDS, O. *Philosophical Transaction of the Royal Society*. On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. 1886, 177, 157-234.
- [4] MARTIN, H. M. *Engineering*. Lubrication of Gear Teeth. 1916, 102, 119-121.
- [5] GÜMBEL, L. *Zeitschrift für das Gesamte Turbinenwesen*. Über Geschmierte Arbeitsräder (On the Lubrication of Gears). 1916, 13, 357.
- [6] MELDAHL, A. *Brown Boveri Review*. Contribution to Theory of Lubrication of Gears and of Stressing of Lubricated Flanks of Gear Teeth. 1941, 28(11), 374-382.
- [7] VON MOHRENSTEIN-ERTEL, A. *In Fortschrittsberichte VDI*, Ser. 1, No. 115, Lang, O. R., and Oster, P. (Eds.), VDI Verlag: Düsseldorf. First Published in 1945 in Russian under the name A. M. Ertel. Die Berechnung der Hydrodynamischen Schmierung Gekrümmter Oberflächen unter Hoher Belastung und Relativbewegung. 1949.
- [8] ZOELLEN, M. *Thin layer flow in rolling element bearings*. University of Twente, Netherlands, 2009. Ph. D. thesis.
- [9] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VITIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [10] BHUSHAN, B. *Introduction to tribology*. Second edition. 2013. ISBN 978-1-119-94453-9.
- [11] NEALE, M. J. *The tribology handbook*. Second edition. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1995. ISBN 0-7506-1198-7.
- [12] AKAMATSU, Y., THUSHIMA, N., GOTO, T., and HIBI, K. *Proceedings of the Japan International Tribology Conference*. Improvement in Oil Film Formation Under Rolling Contact by Controlling Surface Roughness Pattern. 1990, 2, 761-766.

- [13] AKAMATSU, Y., THUSHIMA, N., GOTO, T., and HIBI, K. *Tribology Transactions*. Influence of Surface Roughness Skewness on Rolling Contact Fatigue Life. 1992, 35(4), 571-582.
- [14] ZHAI, X. Z., CHANG, L., HOEPRICH, M. R., and NIXON, H. P. *Tribology Transactions*. On Mechanisms of Fatigue Life Enhancement by Surface Dents in Heavily Loaded Rolling Line Contacts. 1997, 40(4), 708-714.
- [15] DUMONT, M.-L., LUGT, P. M., and TRIPP, J. H. *Journal of Tribology*. Surface Feature Effects in Starved Circular EHL Contacts. 2002, 124(2), 358-366.
- [16] KOŠŤÁL, D. *Studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 74 s. Vedoucí diplomová práce prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D..
- [17] CAGAŠ, R. *Konstrukce dokončovacího stroje pro valivé elementy ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Košťál.
- [18] SEDLAČÍK, J. *Progresivní zařízení pro tvorbu mikrovrtisků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Svoboda, Ph.D.
- [19] LUBRECHT, T., D. MAZUYER a P. CANN. *Starved elastohydrodynamic lubrication theory: application to emulsions and greases*. Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Iv Physique Astrophysique, Jul 2001, č. 2(5), s. 717-728.
- [20] NOVOTNÝ, A. *Konstrukce adaptivního stírače kapaliny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Košťál.
- [21] KOŠŤÁL, D. *Experimentální studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 137 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D..

## 9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN 9

---

EHD	[-]	- elastohydrodynamický (Elastohydrodynamic)
atď.	[-]	- a tak ďalej
Obr.	[-]	- obrázok
EHL	[-]	- elastohydrodynamické mazanie (Elastohydrodynamic Lubrication)
$h_c$	[nm]	- centrálna hrúbka filmu
tzv.	[-]	- tak zvaný
Tab.	[-]	- tabuľka
R	[-]	- redukcia centrálnej hrúbky mazacieho filmu ( $H_c/H_{eff}$ )
h	[nm]	- hrúbka filmu
x	[ $\mu\text{m}$ ]	- dĺžka rezu
napr.	[-]	- napríklad
R <sub>m</sub>	[-]	- redukcia centrálnej hrúbky mazacieho filmu master kontaktu
a pod.	[-]	- a podobne



## 10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

<b>Obr. 2.1</b> Praktické ciele tribológie [1] .....	13
<b>Obr. 2.2</b> Rozdiel medzi plne zaplaveným a hladujúcim kontaktom [8] .....	15
<b>Obr. 2.3</b> Typická EHL hrúbka filmu v závislosti na rýchlosti pre plne zaplavené a hladujúce podmienky. Interferogramy hladujúceho a plne zaplaveného kontaktu. [19] .....	16
<b>Obr. 2.4</b> Hrúbka filmu plne zaplaveného kontaktu [2] .....	17
<b>Obr. 2.5</b> Hrúbka filmu hladujúceho kontaktu [2] .....	18
<b>Obr. 4.1</b> Porovnanie vylešteného (vľavo) a nevylešteného (vpravo) povrchu [17] .	20
<b>Obr. 4.2</b> Pole dentov .....	21
<b>Obr. 4.3</b> Princíp optickej interferometrie .....	21
<b>Obr. 4.4</b> Interferogram .....	22
<b>Obr. 4.5</b> Náskres meracieho zariadenia [16] .....	23
<b>Obr. 4.6</b> Posuv stolu .....	24
<b>Obr. 4.7</b> Koliesko mikroskopu .....	24
<b>Obr. 4.8</b> Stierač maziva [21] .....	24
<b>Obr. 4.9</b> Radiálny posuv páky [21] .....	25
<b>Obr. 5.1</b> Profil povrchu guľičky .....	26
<b>Obr. 5.2</b> Vyhodnotenie 1 .....	27
<b>Obr. 5.3</b> Vyhodnotenie 2 .....	28
<b>Obr. 5.4</b> Vyhodnotenie 3 .....	29
<b>Obr. 5.5</b> Vyhodnotenie 4 .....	30
<b>Obr. 5.6</b> Vyhodnotenie 5 .....	30
<b>Obr. 5.7</b> Vyhodnotenie 6 .....	31
<b>Obr. 5.8</b> Vyhodnotenie 7 .....	32



<b>Obr. 5.9</b> Vyhodnotenie 8 .....	33
<b>Obr. 5.10</b> Vyhodnotenie 9 .....	33
<b>Obr. 5.11</b> Vyhodnotenie 10 .....	34
<b>Graf 5.12</b> Závislosť pomerného útlmu na miere hladovenia ( $R_m$ ) kontaktu .....	34

---

## **11 ZOZNAM TABULIEK**

<b>Tab. 4.1</b> Vlastnosti použitých mazív .....	25
<b>Tab. 6.1</b> Prehľad nárastu a poklesu filmu .....	35